

И. Н. КОРНИЛОВ

ТЕСТИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ GPS/ГЛОНАСС

Учебно-методическое пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

И. Н. Корнилов

ТЕСТИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ GPS/ГЛОНАСС

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлению подготовки
11.05.01 — Радиотехника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 621.396
ББК 32.811я73
К67

Рецензенты:
инженер-конструктор, канд. техн. наук Р. А. Окулов;
канд. техн. наук, доцент И. Г. Самсонов, зам. гл. инженера
АО УПП «Вектор»

Научный редактор — проф., канд. техн. наук Д. В. Астрецов

Корнилов, И. Н.
К67 Тестирование навигационной аппаратуры потребителя
GPS/ГЛОНАСС : учеб.-метод. пособие / И. Н. Корнилов. — Ека-
теринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 48 с.

ISBN 978-5-7996-2044-8

Пособие содержит теоретические сведения о спутниковых навигацион-
ных системах и сигналах. В разделе 3 приведены общие требования, указа-
ния к подготовке и выполнению лабораторных работ, контрольные вопросы.

Библиогр.: 10 назв. Рис. 12.

УДК 621.396
ББК 32.811я73

ISBN 978-5-7996-2044-8

© Уральский федеральный
университет, 2017

Оглавление

Введение	5
----------------	---

Раздел 1. Теоретические сведения о спутниковых навигационных системах	7
1.1. Области применения спутниковой радионавигации	7
1.2. Структура системы GPS	8
1.3. Метод определения координат	10
1.4. Погрешность определения координат	13
1.5. Дифференциальный режим навигации	15

Раздел 2. Имитация навигационных сигналов	18
2.1. Описание имитатора Spirent GSS6700	18
2.2. Методика имитации навигационных сигналов	20
2.3. Методика оценки точности определения координат и скорости НАП	24
2.4. Помехоустойчивость НАП	27
2.4.1. Тестирование помехоустойчивости НАП на соответствие стандартам	27
2.4.2. Методика количественной оценки помехоустойчивости НАП	29
2.4.3. Пример исследования помехоустойчивости НАП GPS/ГЛОНАСС	31

Раздел 3. Лабораторный практикум	33
Общие требования при прохождении лабораторного практикума	33
Лабораторная работа № 1. Знакомство с лабораторным оборудованием и программными средствами	35

Лабораторная работа № 2. Изучение характеристик системы GPS	36
Лабораторная работа № 3. Исследование точности навигации в дифференциальном режиме	38
Лабораторная работа № 4. Влияние помех на НАП	40
Лабораторная работа № 5. Разработка траектории движения для транспортного средства	42
Лабораторная работа № 6. Влияние затенения и многолучевого распространения радиоволн	44
Библиографический список	46

Введение

Спутниковые навигационные технологии широко применяются во всем мире. Уже созданы системы GPS (США), ГЛОНАСС (Россия); также производится развертывание новых систем Galileo (Европа), Beidou (Китай) и др. Существующие системы постоянно модернизируются: вводятся новые спутники, совершенствуются спутниковые сигналы, улучшаются характеристики навигационной аппаратуры потребителя.

Навигационные приемники используются на борту самолетов, на автомобильном, железнодорожном и морском транспорте, в геодезии, строительстве, сельском хозяйстве, горном деле. При таком массовом выпуске навигационных приемников необходимо проводить тестирование их работоспособности и характеристик при различных условиях.

При проведении испытаний, тестировании, определении технических характеристик навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГЛОНАСС/GPS возникает целый ряд проблем. Во-первых, сложно обеспечить полную повторяемость экспериментов. Во-вторых, уровни мощности сигналов от навигационных спутников на входе НАП точно не известны. В-третьих, организация экспериментов с НАП, которой предстоит эксплуатация на море, в полете или даже в космосе, затруднительна и имеет высокую стоимость.

Решением обозначенных проблем является использование имитаторов навигационных сигналов для тестирования НАП в лабораторных условиях. Существует большое количество имитаторов зарубежного и российского производства [1–5]. Но создавать сложные траектории движения транспортных

средств с НАП на борту практически без ограничений по скорости, ускорению и высоте могут только имитаторы компании Spirent [6]. Поэтому в исследовательских лабораториях и на производстве широко применяется тестирование навигационных решений с использованием **имитаторов навигационных сигналов**. Такие имитаторы обеспечивают управление выдаваемыми сигналами и их повторяемость. Они позволяют полностью автоматизировать процесс тестирования путем многократного исполнения заданных пользователем сценариев.

Раздел 1.

Теоретические сведения о спутниковых навигационных системах

1.1. Области применения спутниковой радионавигации

Спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС предоставляют услуги высокоточного персонального позиционирования, открытые для массового использования на безвозмездной основе. Это обеспечивает их внедрение во многие области человеческой деятельности.

Наиболее массовым является использование спутниковой навигации на борту автомобиля для помощи водителю в управлении его движением по незнакомому маршруту, ориентации в незнакомой местности, поиска интересующих объектов, оперативного планирования движения, получения экстренной помощи в аварийных или иных чрезвычайных ситуациях.

Навигатор (GPS-приемник) необходим путешественникам и туристам, спортсменам, рыбакам и охотникам, любителям продолжительных лесных прогулок.

Навигаторы имеют и множество профессиональных применений. Они используются в авиации и в космосе, на морском, речном и железнодорожном транспорте, в грузовых и пассажирских автомобильных перевозках. Особо точная аппаратура навигации применяется для топографического картографирования местности, проведения работ по землеустройству, в строительных делах.

Следует отметить, что спутниковые радионавигационные системы по первоначальному замыслу были созданы для военных целей и поэтому охватывают также обширную область военных применений.

Системы GPS и ГЛОНАСС реализуют технологию спутниковой навигации в основном на одинаковых принципах. Рассмотрим эти принципы применительно к системе GPS [2].

1.2. Структура системы GPS

Спутниковая радионавигационная система GPS (*Global Positioning System*) создана в США и полностью введена в эксплуатацию в 1995 году. Она включает в себя три сегмента: **космический** с орбитальной группировкой навигационных космических аппаратов (НКА), **наземный** комплекс управления (НКУ), содержащий станции слежения и контроля за состоянием НКА, и **пользовательский**, содержащий аппаратуру потребителей системы.

Полная орбитальная группировка космического сегмента GPS образована из 24 основных и трех резервных НКА, которые размещены на шести круговых орбитах высотой приблизительно 20000 км, наклоненных к плоскости экватора на 55° и равномерно разнесенных по долготе через 60° . Каждый НКА предназначен для формирования и излучения навигационного сигнала. Навигационные сигналы разных НКА излучаются на одной частоте — 1575,42 МГц — и различаются структурой дальномерного кода, входящего в состав сигнала. Навигационные радиосигналы излучаются в сторону Земли с помощью передающих антенн с шириной диаграммы направленности 38° . Такой ширины достаточно для освещения всего диска Земли и околоземного пространства до высоты в 2000 км.

Количество НКА в орбитальной группировке и распределение их по орбитам выбрано таким образом, чтобы в зоне видимости над каждой точкой земной поверхности постоянно находилось не менее пяти НКА. Исключения составляют полярные и приполярные области, где это условие может не выполняться в некоторые промежутки времени.

Наземный комплекс управления состоит из нескольких наземных станций, осуществляющих слежение за космическими аппаратами орбитальной группировки.

Основной задачей НКУ является эфемеридное и частотно-временное обеспечение НКА.

Эфемеридное обеспечение означает прогноз параметров движения НКА на опорные моменты времени и загрузку этой информации на борт НКА для последующей передачи ее потребителю в составе навигационного сигнала. Знание параметров движения НКА позволяет потребителю прогнозировать координаты навигационных спутников на любой текущий момент времени и по этим координатам определять координаты собственного местоположения, выполнив определенные навигационные измерения.

Для формирования эфемеридной информации используются уравнения движения космических аппаратов по заданным орбитам, учитывающие различные возмущающие факторы. Два раза в сутки наземными станциями слежения осуществляется измерение истинных параметров движения НКА. Результаты этих измерений используются для уточнения уравнений движения. Сформированная таким образом эфемеридная информация далее передается через станции слежения на борт НКА, где закладывается в навигационный сигнал, поступающий от НКА потребителю.

Частотно-временное обеспечение означает прогноз ухода бортовой шкалы времени НКА относительно шкалы времени системы и загрузку на борт НКА частотно-временных поправок к бортовой шкале для последующей передачи этих поправок потребителю в составе навигационного сигнала. Знание этих по-

правок обеспечивает синхронизацию бортовых шкал времени (БШВ) всех НКА между собой и со шкалой времени системы. Без такой синхронизации невозможно точное определение потребителем своих координат.

Для минимизации ухода БШВ на борту каждого НКА применен атомный стандарт частоты, имеющий относительное отклонение среднесуточных значений частоты $(2...4) \cdot 10^{-13}$. Этот стандарт частоты используется для формирования БШВ. Для синхронизации всех НКА наземные станции следят за изменениями бортовых шкал времени всех навигационных спутников, определяют расхождения БШВ относительно системной шкалы для каждого навигационного спутника и передают на борт каждого НКА частотно-временные поправки, относящиеся к его БШВ. Эти поправки затем закладываются в навигационный сигнал, излучаемый НКА, и с этим сигналом поступают потребителю. Таким образом, потребитель имеет информацию о поправках к БШВ всех НКА, находящихся в зоне видимости, что и обеспечивает их синхронизацию.

Решение задач эфемеридного и частотно-временного обеспечения гарантирует необходимый уровень точности навигационных определений потребителем.

Прибор пользователя системой GPS (навигатор) имеет возможность принимать сигналы одновременно от нескольких НКА. По принятым сигналам он определяет координаты пользователя, параметры его движения и выдает точное время, соответствующее всемирному координированному времени (UTC).

1.3. Метод определения координат

Навигатор использует псевдодальномерный метод определения координат по сигналам опорных станций. Псевдодальномерный метод является модификацией дальномерного принципа определения местоположения, когда измеряются расстояния

от местонахождения пользователя до опорных точек, координаты которых являются известными. При этом для определения трех координат пользователя (x, y, z) достаточно знать расстояния до трех опорных точек.

Искомые координаты пользователя получают из решения уравнения

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (1)$$

где x_i, y_i, z_i — известные координаты опорных точек (ОТ); R_i — измеренные расстояния до этих ОТ от местоположения пользователя, а $i = 1, 2, 3$ (соответственно, решается система из трех уравнений для получения координат).

Уравнение (1) описывает в прямоугольной системе координат (X, Y, Z) сферическую поверхность с центром сферы в опорной точке (x_i, y_i, z_i) и с радиусом равным R_i . Эта поверхность, образующая геометрическое место точек с одинаковым расстоянием до заданной ОТ, называется *поверхностью положения*. Три поверхности положения, соответствующие разным ОТ, пересекаются в двух точках, одна из которых является искомым местоположением пользователя. Исключение неоднозначности достигается использованием априорной информации или введением в процедуру навигационных определений дополнительной ОТ.

В спутниковой навигации функции опорных точек выполняют НКА, излучающие навигационные сигналы. Измерение расстояния до НКА проводится путем измерения времени задержки дальномерного кода, входящего в состав излучаемого спутниками навигационного сигнала. Для точного измерения времени задержки необходимо знать точное время излучения «начала» дальномерного кода и момент времени его приема в навигаторе. На приемной стороне начало излучения точно неизвестно, т. к. шкалы времени навигатора и НКА независимо от нас имеют сдвиг на неизвестную величину Δt . Эта величина приводит к ошибке измерения расстояния:

$$\Delta R = \Delta t \cdot c, \quad (2)$$

где c — скорость распространения радиоволны.

Шкалы времени всех НКА синхронизированы, и поэтому ошибка (2) будет приблизительно одинаковой при измерении расстояния до разных НКА. Эту ошибку можно оценить, принимая дополнительно к сигналам трех НКА сигнал еще одного НКА. При этом три координаты пользователя (x, y, z) вместе с корректирующей поправкой Δt к его шкале времени находятся из решения уравнения

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + \Delta t \cdot c, \quad (3)$$

где x_i, y_i, z_i — координаты i -го НКА в момент измерения расстояния R_i ; R_i — измеренные расстояния (псевдодальности) от прибора пользователя до четырех НКА; $i = 1, 2, 3, 4$ (соответственно, решается система из четырех уравнений для получения координат).

Информация о координатах НКА, необходимая для решения уравнений (3), поступает на приемник навигатора в составе навигационного сигнала.

Координаты НКА и навигатора задаются и определяются в геоцентрической подвижной системе координат. Пользователь получает информацию о своем местоположении в геодезической системе координат, которая определяет его расположение относительно поверхности Земли широтой, долготой и высотой. Эта информация и отображается на экране навигатора.

Таким образом, персональный навигатор выдает координаты своего местоположения и точное время, привязанное к всемирному координированному времени (UTC).

Кроме определения координат прибор выдает также информацию о скорости движения пользователя и ее направлении, т. е. вычисляет три составляющих скорости ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$) в геоцентрической подвижной системе координат. Пользователь полу-

чает информацию в геодезической системе координат, т. е. относительно поверхности Земли.

1.4. Погрешность определения координат

Погрешность определения координат пользователя и его вектора скорости зависит от нескольких факторов, которые можно разделить на системные и вызванные условиями приема навигационных сигналов.

К *системным факторам* относятся:

- погрешность эфемеридного обеспечения НКА;
- погрешность частотно-временного обеспечения НКА;
- погрешность измерения навигатором расстояния до НКА, вызванная непрогнозируемой рефракцией радиоволн при их распространении от НКА до пользователя, а также недостаточно точным знанием фактической скорости распространения радиоволн и др.

Первые два фактора вносят погрешность в задание текущих координат НКА (x_i, y_i, z_i), а третий — в значения навигационных параметров R_i , измеряемых навигатором.

Системные факторы при наиболее благоприятных условиях приема приводят к погрешности определения координат (имеется в виду среднеквадратическая погрешность) не более десяти метров.

В *реальных условиях* погрешность зависит от количества НКА, находящихся в зоне видимости пользователя, от отношения сигнал/помеха по каждому НКА, от взаимного расположения НКА в зоне видимости пользователя (от геометрического фактора).

Наличие в зоне видимости более четырех НКА позволяет повысить точность местоопределения пользователя путем уточнения координат, первоначально найденных из решения урав-

нений (3). Координаты уточняются по сигналам, принятым навигатором и не использованным в этих уравнениях.

Увеличение отношения сигнал/помеха уменьшает флуктуационную погрешность измерения навигатором навигационных параметров (псевдодальностей) и тем самым повышает точность определения координат пользователя.

Расположение НКА относительно пользователя характеризуется величиной геометрического фактора.

Геометрический фактор является мерой увеличения погрешности определения местоположения пользователя по сравнению с погрешностью измерения навигационных параметров. Наиболее наглядно влияние геометрического фактора можно пояснить на примере определения плоских координат пользователя дальномерным методом (рис. 1). В этом случае навигатором измеряются дальности R_i из места расположения пользователя Π до двух навигационных точек НТ1 и НТ2 и таким образом определяются две линии положения — две дуги окружностей с радиусами R_1 и R_2 и с центрами в точках НТ1 и НТ2 соответственно.

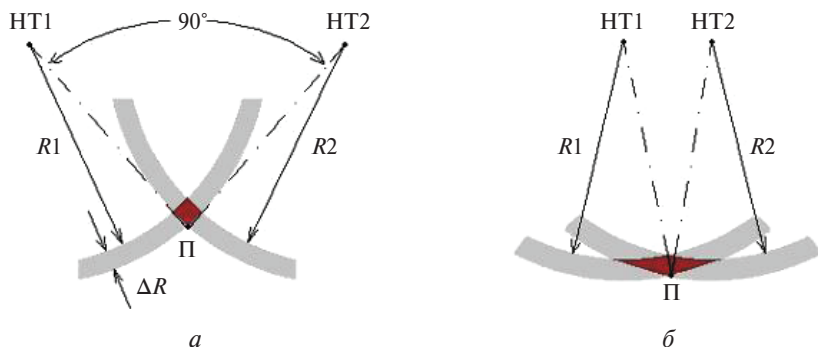


Рис. 1. Иллюстрация понятия «геометрический фактор»

Существующая погрешность определения навигационных параметров дает «размытую» линию положения, которая изображена на рис. 1 дорожкой с шириной ΔR . Величина ΔR яв-

ляется среднеквадратической погрешностью определения навигационного параметра R_i . Пересечение таких «размытых» дорожек, соответствующих разным линиям положения, дает область неопределенности местоположения пользователя, отмеченная на рис. 1 темным цветом. Линейные размеры этой области характеризуют возможные отклонения полученных оценок местоположения от истинного положения. Эти отклонения принимают минимальные значения при расположении навигационных точек под прямым углом относительно пользователя (рис. 1, *a*), поэтому такое расположение является наилучшим, и ему соответствует минимальное значение геометрического фактора.

При определении пространственных координат по четырем и более НКА также существует наилучшее расположение навигационных спутников относительно наблюдателя. Равномерное распределение НКА по небосводу приводит к меньшим значениям геометрического фактора, чем их скученность вблизи одной точки.

1.5. Дифференциальный режим навигации

Радикальным средством повышения точности местоопределения является работа в дифференциальном режиме навигации. *Дифференциальный режим* основан на пространственно-временной корреляции ошибок навигационных определений. При этом ошибки, возникающие у разных потребителей, находящихся в зоне пространственной корреляции, отличаются незначительно и мало изменяются во времени.

Для реализации дифференциального режима используются корректирующие станции (КС), которые имеют точно известные координаты. На таких КС путем сравнения точно известных координат с найденными по навигационным сигналам

выявляются ошибки навигационных определений. Затем информация об этих ошибках передается по специальному радиоканалу пользователям, находящимся в зоне расположения КС, для коррекции их координат.

Используют два вида коррекции: коррекция измеренных псевдодальностей R_i с последующим вычислением скорректированных координат и коррекция непосредственно координат пользователя (x, y, z). В первом случае с КС передаются пользователю данные об ошибках измерения псевдодальностей, а во втором — об ошибках измерения координат. В обоих случаях переданные пользователю данные вычитаются из результатов его собственных определений, что повышает точность навигации.

Радиус пространственной корреляции ошибок составляет несколько сотен километров. При этом чем меньше расстояние между пользователем и КС, тем эффективнее дифференциальный режим. Эффективность такого режима сохраняется на расстояниях между пользователями и КС до 500 км.

Во многих навигаторах предусмотрена возможность приема сигналов КС через космические аппараты американской широкозонной дифференциальной подсистемы WAAS. Спутники системы WAAS размещены на геостационарной орбите и транслируют сигналы от КС на частоте GPS. Однако состояние системы WAAS в настоящее время рассчитано на обслуживание только тех пользователей, которые расположены на североамериканском континенте и в Северной Атлантике.

Для других пользователей дифференциальный режим можно создать, организовав передачу корректирующих сигналов от региональных КС в специальном формате RTSM SC-104, используя любой подходящий радиоканал. Данные этого формата могут быть введены в навигатор через специальный порт.

Дифференциальный режим можно реализовать и без КС, если определять не абсолютные, а относительные координаты. Например, вы начинаете движение из пункта А. Абсолют-

ные координаты этого пункта (x_a, y_a, z_a) определяются вашим навигатором в номинальном режиме работы. В последующем движении вас интересует местонахождение относительно этого пункта А. Относительные координаты (x_{ba}, y_{ba}, z_{ba}) промежуточной точки пути В равны:

$$x_{ba} = (x_b - x_a), y_{ba} = (y_b - y_a), z_{ba} = (z_b - z_a), \quad (4)$$

где x_a, y_a, z_a — абсолютные координаты точки В, определенные навигатором. Поскольку координаты (x_a, y_a, z_a) и (x_b, y_b, z_b) содержат коррелированные ошибки, то относительные координаты (4) не будут содержать этих ошибок. Иначе говоря, точность определения относительных координат будет такой же, как при определении абсолютных координат в дифференциальном режиме. Из этого, в частности, следует, что расстояние R_{ab} по прямой между двумя путевыми точками А и В измеряется навигатором с погрешностью дифференциального режима работы, так как

$$R_{ab} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}. \quad (5)$$

Ошибки местоопределения пользователя в дифференциальном режиме навигации на порядок меньше, чем в номинальном режиме работы.

Раздел 2.

Имитация навигационных сигналов

2.1. Описание имитатора Spirent GSS6700

Тестирование реальной навигационной аппаратуры потребителя (НАП) в лабораторных условиях возможно с применением имитаторов навигационных сигналов. Такие имитаторы выпускают отечественные и зарубежные фирмы [1–6]. Имитаторы различаются дополнительными возможностями по имитации различных сценариев движения, многолучевого распространения, учета распространения радиоволн через атмосферу.

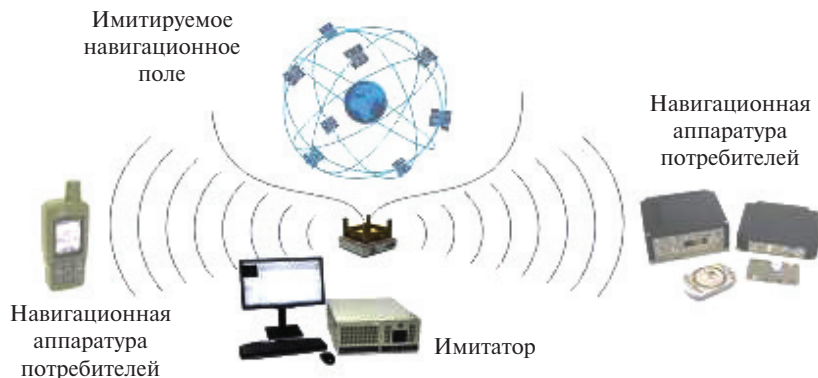


Рис. 2. Тестирование при помощи имитатора

Рассмотрим имитатор Spirent GSS6700, используемый в данном лабораторном практикуме. Внешний вид имитатора показан на рис. 3. Имитатор сигналов глобальных навигационных спут-

никовых систем (ГНСС) GSS6700 выдает когерентные сигналы GPS, ГЛОНАСС в частотном диапазоне L1. До 12 каналов каждого имитируемого созвездия спутников предоставляют достаточный набор сигналов для решения широкого спектра задач, связанных с разработкой и интеграцией навигационных систем.

Совместно с имитатором используется программное обеспечение SimGEN. С его помощью можно имитировать сигналы спутников, распространение этих сигналов в атмосфере, затенение (приемника) наземными объектами, диаграмму направленности приемной антенны, многолучевое распространение радиоволн, траекторию движения транспортного средства, имеются в этом пакете и различные модели ошибок.



Рис. 3. Внешний вид имитатора сигналов

Имитатор обладает следующими характеристиками:

- имитация сигналов GPS, ГЛОНАСС в одном шасси;
- 12 независимых каналов для каждого созвездия;
- лучшие в данном классе оборудования показатели точности, достоверности и надежности;
- выходные частоты:
 - GPS L1 C/A: 1575,42 МГц;
 - ГЛОНАСС L1 (канал 0): 1602 МГц;
- точность сигнала:
 - псевдодальность: $\pm 0,002$ м;
 - псевдоскорость: $\pm 0,001$ м/с;

- качество сигнала:
 - паразитные составляющие (макс.): -30 дБн;
 - гармоники (макс.): -35 дБн;
 - фазовый шум (макс.): $0,02$ рад RMS;
 - нестабильность частоты: $\pm 5 \cdot 10^{-10}$;
- номинальный уровень сигнала:
 - GPS: -130 дБм.
 - ГЛОНАСС: -131 дБм.
- регулировка уровня сигнала:
 - диапазон: $+15/-20$ дБ.
 - разрешающая способность: $0,1$ дБ.
 - точность: $\pm 0,5$ дБ.

В полном составе имитатор позволяет:

- проводить имитацию навигационных сигналов;
- тестировать навигационные приемники;
- определять параметры навигационного приемника (точность определения местоположения в статическом и динамическом режимах (с заданием траектории движения приемника), чувствительность, время «холодного» старта и др.);
- записывать и воспроизводить реальные навигационные сигналы (при дополнении устройством записи и воспроизведения Spirent GSS6400);
- тестировать работу навигационного приемника при наличии помех.

2.2. Методика имитации навигационных сигналов

Полная схема испытательного стенда, основным элементом которого является имитатор Spirent GSS6700, представлена на рис. 4. Такой стенд позволяет в лабораторных условиях определять технические параметры НАП, создавать траектории

движения различных транспортных средств: автомобиля, самолета, ракеты, корабля. Стенд позволяет также записывать реальные навигационные сигналы и многократно их воспроизводить.

Имитация навигационных сигналов аппаратурой Spirent GSS6700 осуществляется с помощью контроллера с программным обеспечением SimGEN. Вид окна среды SimGEN, в котором задаются параметры движения навигационного приемника и другие управляющие параметры, показан на рис. 4.

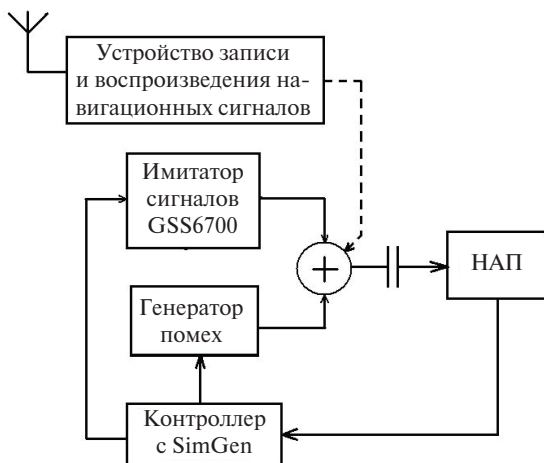


Рис. 4. Испытательный стенд

Рассмотрим, что определяют параметры в окне создания сценария на рис. 5:

- **Start time** определяет время начала и длительность сценария;
- **Options** определяет параметры сценария;
- **Atmosphere** определяет модель атмосферы, детализирующую параметры ионосферы и тропосферы;
- **Constellation** определяет параметры созвездия;
- **Vehicle** определяет тип транспортного средства, на котором установлен тестируемый навигационный приемник;

- **Vehicle-Motion** определяет траекторию и параметры движения транспортного средства;
- **Vehicle-Options** для каждого транспортного средства в сценарии определяет дополнительные параметры. Они зависят от типа транспортного средства;
- **Antenna-Signal types** определяет тип сигнала (GPS, ГЛОНАСС);
- **Antenna-Options** охватывает смещение антенны с центра тяжести транспортного средства;
- **Antenna pattern control** показывает, что каждая антенна может иметь различные опции и диаграммы направленности.

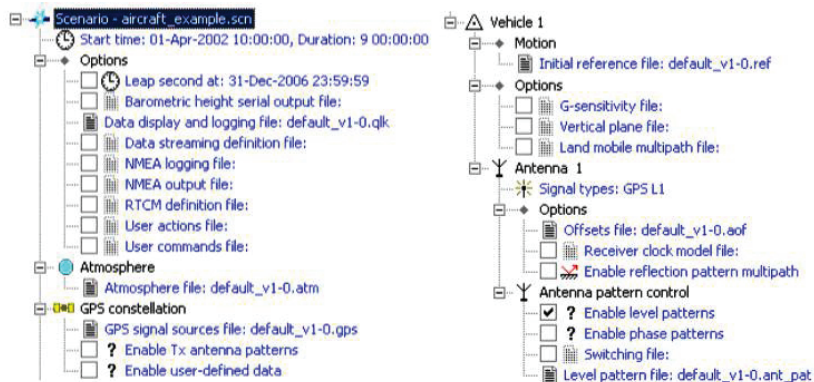


Рис. 5. Окно создания сценария среды SimGEN

Таким образом, для имитации навигационного сигнала может применяться методика в несколько этапов.

1. Пользователь определяет время начала и длительность сценария (**Start time**).
2. Задается файл с моделью атмосферы. Для большинства задач можно оставить файл, стоящий по умолчанию. Можно при необходимости обнулить задержку сигналов в тропосфере. Можно выбрать различные математические модели ионосферы.

3. Настраивается группировка космических аппаратов. Можно настраивать параметры каждого навигационного спутника. Можно задавать изменение мощности навигационного сигнала по мере приближения или отдаления спутника от потребителя. Мощность может быть постоянной или меняться пропорционально квадрату расстояния. Перед настройкой необходимо определить тип сигнала антенны **Antenna-Signal types** (GPS, ГЛОНАСС) и частотный диапазон.

4. Создается траектория движения НАП. В SimGEN существуют несколько стандартных траекторий, описывающих простые движения. Например, движение по кругу или по прямоугольнику. Более сложные траектории создаются при помощи команд, добавляемых в файл **Command**. Для различных видов транспортных средств существуют свои команды управления движением. Файл команд для объекта представляет собой последовательность маневров.

5. Определяются индивидуальные особенности транспортного средства, на котором установлена НАП (максимальная скорость, максимальное ускорение).

6. Выставляется наличие многолучевого распространения сигналов в **Antenna-Options**, а также задается диаграмма направленности в **Antenna pattern control**.

7. Задаются мощности навигационных сигналов от спутников (в окне Power Adjustment). Итоговые уровни мощности для генерирования сигналов от навигационных спутников отображаются в окне Power Levels Graph (рис. 6).

8. Проверяется траектория движения НАП при помощи утилиты Check all.

9. Запускается имитация навигационного поля командой **RUN**.

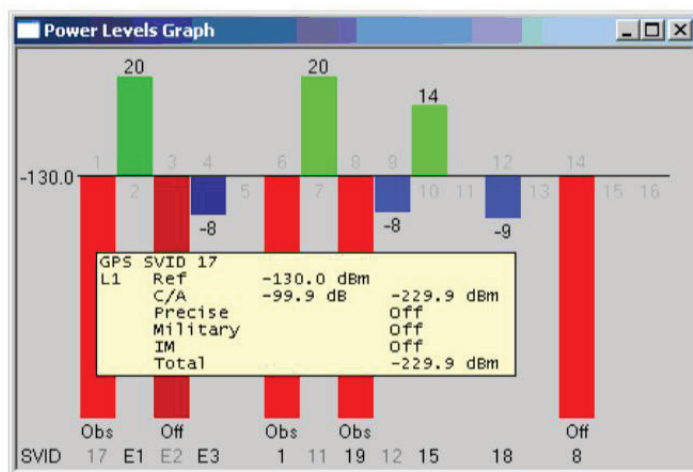


Рис. 6. Окно, отображающее значения мощностей навигационных сигналов

2.3. Методика оценки точности определения координат и скорости НАП

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 7. Имитатор навигационных сигналов генерирует сигналы систем GPS и ГЛОНАСС на частоте L1 при помощи контроллера с программным обеспечением SimGen [7].

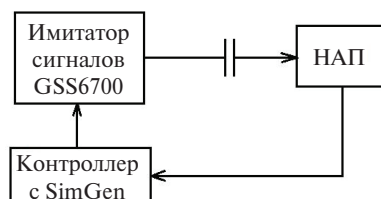


Рис. 7. Схема эксперимента

Эксперимент проводится в несколько этапов.

1. В SimGEN пишется сценарий движения по заданной траектории. Для этого с помощью команды **Reference** задается точка старта, начальная скорость и направление. Далее при помощи команды **Combined** изменяется скорость, направление движения и высота. Такие изменения производятся в соответствии с траекторией движения.

2. Запускается имитация навигационных сигналов. На выходе имитатора генерируется навигационное поле.

3. НАП принимает имитируемые сигналы навигационных спутников, решает навигационную задачу и выдает данные на персональный компьютер. Для отображения и накопления данных от НАП используется среда u-Center.

4. Координаты и значения скорости, измеренные НАП, сохраняются в виде таблиц.

5. Вычисляется среднее отклонение координат имитируемой траектории и полученных от НАП с исходными траекториями движения по формуле:

$$X_{\text{ош}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)}{n}, \quad (6)$$

где $X_{\text{ош}}$ — средняя ошибка измерения координаты НАП; x_i — значение координаты, измеренное НАП; x_i^* — координата исходной траектории движения; n — количество отсчетов.

Например, на рис. 8 представлены исходная траектория движения и траектория, полученная от НАП. При вычислении ошибки по формуле (6) средняя ошибка составляет 11 метров.

6. Вычисляется среднее отклонение реальной скорости объекта от скорости, определяемой навигационным приемником, по формуле:

$$V_{\text{ош}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_i^*)}{n}, \quad (7)$$

где $V_{\text{ош}}$ — средняя ошибка измерения скорости объекта навигационным приемником; V_i — значение скорости, измеренное НАП; V_i^* — значение реальной скорости движения объекта; n — количество отсчетов.

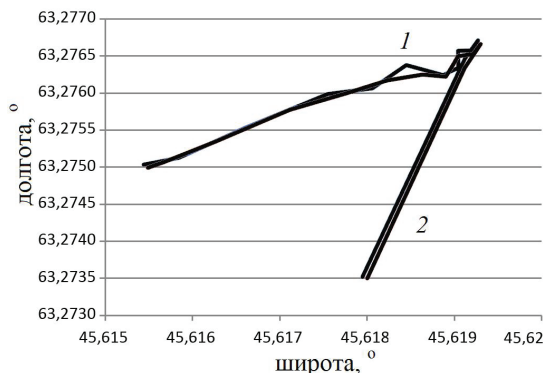


Рис. 8. Траектория полета:

1 — исходная траектория;
2 — траектория, полученная от навигационного приемника

Например, на рис. 9 представлены исходная зависимость скорости движения объекта от времени и скорость, определяемая тестируемым навигационным приемником.

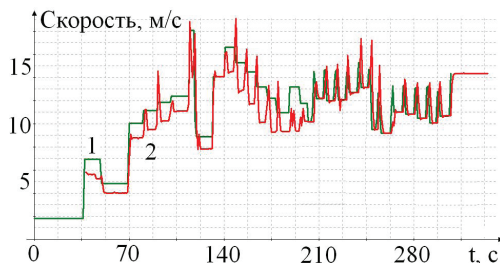


Рис. 9. График зависимости скорости от времени:

1 — зависимость скорости в имитируемом сигнале;
2 — скорость, определяемая навигационным приемником

Исходя из полученных данных, сделаем количественную оценку средней ошибки измерения скорости навигационным приемником. Используя формулу (7), получаем, что средняя ошибка измерения скорости в данном примере равна 0,8 м/с.

2.4. Помехоустойчивость НАП

Помехи на входе НАП могут быть как естественного, так и искусственного происхождения. Поскольку уровень навигационных сигналов на входе НАП имеет очень низкое значение, то даже сравнительно маломощные источники помех могут оказывать существенное влияние на работу навигационного приемника. В опубликованной литературе отмечается, что при использовании C/A кода GPS для поиска и вхождения в режим слежения пороговое отношение помеха/сигнал составляет 22 дБ [1]. Пороговое отношение для срыва слежения несколько больше. В режиме слежения увеличение уровня помехи до порогового ухудшает точность определения координат, но сохраняет рабочее состояние приемника. Превышение порогового отношения приводит к срыву сопровождения сигналов и блокировке приемника.

2.4.1. Тестирование помехоустойчивости НАП на соответствие стандартам

Для тестирования навигационной аппаратуры GPS и ГЛОНАСС на помехоустойчивость собирается схема испытательного стенда, показанная на рис. 10. Тестируемая НАП подключается к персональному компьютеру (ПК) с анализирующей программой u-Center.

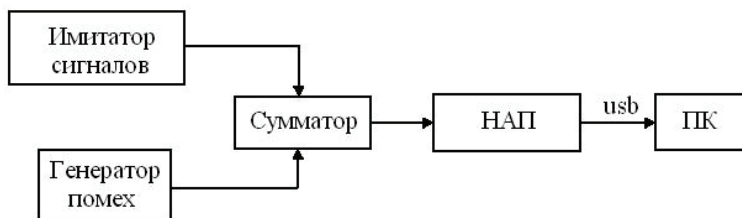


Рис. 10. Схема испытательного стенда

Тестирование работы НАП осуществляется отдельно по системам GPS и ГЛОНАСС. Для навигационных приемников системы GPS пороговые значения уровня гармонической помехи представлены в табл. 1. При этом под пороговым значением понимается максимальное значение мощности помехи, при котором навигационный приемник еще может определять координаты и скорость потребителя. Это значение существенно зависит от частоты помехи.

Таблица 1

Пороговые значения гармонических помех при работе по сигналам GPS

Частота, МГц	Пороговые значения уровня помех, дБВт
$F < 1529$	–55
$1529 < F < 1565$	Линейно изменяется от –55 до –136
$1565 < F < 1585$	–136
$1585 < F < 1607,5$	Линейно изменяется от –136 до –75
$1607,5 < F < 1640$	Линейно изменяется от –75 до –55
$F > 1640$	–55

Для навигационных приемников системы ГЛОНАСС пороговые значения уровня гармонической помехи представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Пороговые значения гармонических помех при работе
по сигналам ГЛОНАСС**

Частота, МГц	Пороговые значения уровня помех, дБВт
$1578 < F < 1593$	Линейно изменяется от -80 до -136
$1593 < F < 1609$	-136
$1609 < F < 1620$	Линейно изменяется от -136 до -80
$1620 < F < 1635$	Линейно изменяется от -80 до -55
$1607,5 < F < 1640$	-55

2.4.2. Методика количественной оценки помехоустойчивости НАП

Исследование помехоустойчивости приемника НАП GPS/ГЛОНАСС выполняется в определенном порядке.

1. Запускается имитация навигационного сигнала одной из систем GPS или ГЛОНАСС по описанному выше алгоритму.

2. В программе u-Center ожидается переход НАП в режим слежения за навигационными сигналами. Наличие режима слежения показывает значение 3D-параметра Fix Mode в окне Data.

3. Задается вид, выставляется несущая частота и мощность помехи и начинается ее генерация. Для этих целей используется векторный генератор Agilent N5272, который позволяет создавать высокочастотные колебания без модуляции и с амплитудной, частотной или фазовой модуляцией.

4. Оценка действия помехи ведется по графику зависимости погрешности измерения координат навигационным приемником от времени (параметр PACC3D у GPS и параметр PDOP у ГЛОНАСС в программе u-Center). Пример данной зависимости приведен на рис. 11.

5. Из полученного графика фиксируется значение погрешности измерения координат, соответствующее установившемуся режиму.

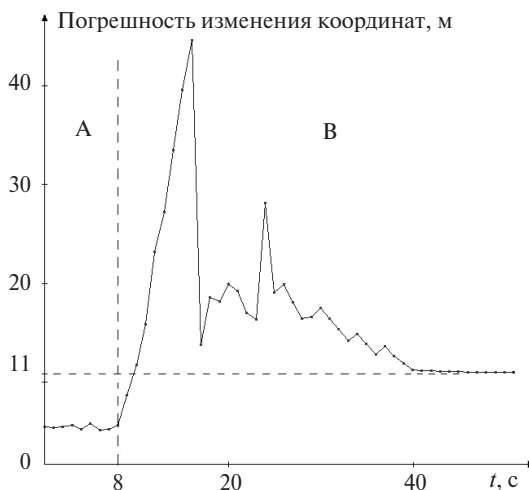


Рис. 11. Погрешность измерения координат навигационным приемником от времени: область *A* — без помехи, область *B* — с помехой

6. Изменяется уровень мощности помехи и определяется погрешность измерения координат приемника НАП. Таким образом, снимается характеристика сопровождения приемника при наличии помехи на входе.

7. В результате находится значение порогового отношения помеха/сигнал по мощности, при котором происходит срыв слежения за сигналами от навигационных спутников. Срыв слежения показывает значение No fix параметра Fix Mode в окне Data.

Количественно помехоустойчивость оценивается коэффициентом подавления, который численно равен максимальному отношению помеха/сигнал, при котором НАП еще определяет свои координаты.

2.4.3. Пример исследования помехоустойчивости НАП GPS/ГЛОНАСС

Было проведено исследование помехоустойчивости по описанной в предыдущем пункте методике. При исследовании помехоустойчивости GPS-приемника рассматривались два типа помех: гармоническая на частоте 1575,42 МГц и частотно-модулированная с центральной частотой 1575,42 МГц и девиацией частоты 1 МГц. При исследовании помехоустойчивости приемника ГЛОНАСС рассматривались два типа помех: гармоническая на частоте 1602 МГц и частотно-модулированная с центральной частотой 1602 МГц и девиацией частоты 5 МГц. Полученные характеристики показаны на рис. 12 для приемника GPS сплошной линией, а для приемника ГЛОНАСС — пунктирной.

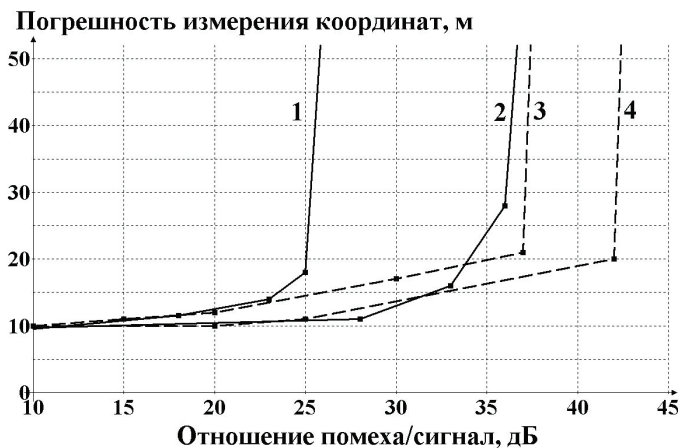


Рис. 12. Погрешность измерения координат от отношения помеха/сигнал:

1, 3 — частотно-модулированная помеха; 2, 4 — гармоническая помеха

Количественная оценка помехоустойчивости GPS-приемника следующая: коэффициент подавления для частотно-

модулированной помехи равен 25 дБ, а для гармонической — 36 дБ. Количественная оценка помехоустойчивости приемника ГЛОНАСС следующая: коэффициент подавления для частотно-модулированной помехи равен 37 дБ, а для гармонической — 42 дБ. Таким образом, широкополосная частотно-модулированная помеха сильнее влияет на работу навигационных приемников. Помехоустойчивость приемников системы ГЛОНАСС выше, чем у НАП GPS.

Раздел 3. Лабораторный практикум

Общие требования при прохождении лабораторного практикума

Целью лабораторного практикума является закрепление и расширение знаний по дисциплине «Спутниковые радионавигационные системы», изучаемой студентами по направлению подготовки 11.05.01 — «Радиотехника» в рамках магистерской программы «Радиоэлектронные системы локации и навигации», а также дисциплины «Теория и техника радиолокации и радионавигации», изучаемой бакалаврами.

Практикум содержит шесть работ. В первой лабораторной работе студенты знакомятся с лабораторным оборудованием и программными средствами. Целью второй работы является знакомство с характеристиками спутниковых навигационных систем. Третья и пятая работы рассматривают вопросы точности измерения координат и скорости навигационным приемником. Четвертая и шестая работы посвящены влиянию помех, затенения и многолучевого распространения навигационных сигналов на точность и стабильность работы навигационной аппаратуры потребителя.

Выполнение каждой работы разделяется на три этапа:

- 1) домашняя подготовка;
- 2) выполнение экспериментальных, вычислительных и оформительских работ в лаборатории;
- 3) подготовка отчета по лабораторной работе и его защита.

1. Домашняя подготовка

В процессе домашней подготовки студент обязан изучить (или повторить) теоретический материал, относящийся к теме лабораторной работы, составить необходимые структурные и функциональные схемы, относящиеся к выполнению работы, продумать порядок проведения работы, подготовить таблицы для записи результатов.

2. Лабораторное занятие

Непосредственному выполнению лабораторной работы, как правило, предшествует защита отчета по предыдущей работе и коллоквиум по предстоящей работе.

На защите отчета преподаватель выясняет, насколько глубоко студенты разобрались в результатах и методике проведенных исследований, какие сделаны выводы, в какой форме представлены результаты. Непредставление отчета и его неудовлетворительная защита ведут к недопуску к предстоящей работе.

Коллоквиум по предстоящей работе проводится для проверки качества подготовки к ней студентов. Преподаватель проводит опрос студентов по содержанию контрольных вопросов, перечень которых приведен в указаниях к конкретным работам. При недостаточной подготовке к выполнению работы студенты к ней не допускаются.

Порядок проведения экспериментов приведен в указаниях к конкретным лабораторным работам, он может быть скорректирован преподавателем как в сторону уменьшения, так и повышения количества экспериментов. При проведении измерений параметров необходимо правильно определять их масштабные единицы. Экспериментальная часть считается выполненной после просмотра и утверждения преподавателем черновика отчета.

3. Составление и защита отчета

Отчеты выполняются на листах стандартного формата с представлением схем, таблиц, графиков, иллюстрирующих резуль-

таты эксперимента. Особое внимание при составлении отчета следует уделять выводам, в которых должны быть сформулированы конкретные результаты исследований. Кроме того, в выводах должен присутствовать анализ соответствия результатов, полученных в ходе экспериментов, с теоретическими положениями и расчетами, выполненными при подготовке к работе. При наличии несовпадений необходимо объяснить причины этого явления при выполнении лабораторных исследований, по которым составлен отчет.

Лабораторная работа № 1. Знакомство с лабораторным оборудованием и программными средствами

1. *Цель работы:* ознакомление с функциональными возможностями специального оборудования и программных средств, используемыми в составе лабораторного стенда, а также правилами работы с этими средствами.

2. *Указания к выполнению*

Теоретические сведения о принципах работы и функциональных возможностях используемого оборудования и программных средств содержатся в теоретической части, а также в руководстве по программной среде SimGEN.

3. *Порядок выполнения*

1. Изучите теоретические сведения.
2. Письменно ответьте на контрольные вопросы.

4. *Контрольные вопросы*

1. Какой метод определения координат используется в спутниковых навигационных системах GPS и ГЛОНАСС?
2. Какие факторы влияют на точность определения координат по технологии спутниковой радионавигации?

3. В чем состоит сущность понятия «эфмеридное обеспечение пользователя»?
 4. Какова последовательность действий при имитации навигационного сигнала на испытательном стенде?
 5. На что влияет задание в лабораторной установке географического положения навигационного приемника?
 6. Какой уровень сигнала необходимо подавать на вход навигационного приемника и как выставить этот уровень?
 7. Как сформировать необходимый вид помех и задать их уровень?
 8. Какая информация и в каком стандарте снимается с выхода навигационного приемника?
 9. Какую информацию отображает анализирующая программа u-Center?
 10. Какие возможности предоставляет программная среда SimGEN для имитации навигационных сигналов.
 11. Из каких блоков состоит имитатор навигационных сигналов?
5. *Содержание отчета:* цель работы, письменные ответы на приведенные контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 2.

Изучение характеристик системы GPS

1. *Цель работы:* изучить характеристики навигационного поля GPS, получить практические навыки имитации навигационных сигналов.

2. *Указания к выполнению*

Теоретические сведения о принципах работы и функциональных возможностях используемого оборудования и программных средств содержатся в теоретической части, а также в руководстве по программной среде SimGEN.

3. *Порядок выполнения*

1. Изучить характеристики навигационного поля в зоне видимости для заданного географического расположения потребителя, в т. ч.:
 - подготовить оборудование для имитации навигационного поля, соответствующего заданной эфемеридной информации и заданному географическому расположению потребителя;
 - запустить оборудование для имитации навигационного поля;
 - определить количество и размещение навигационных спутников в зоне видимости;
 - зафиксировать уровни сигналов, поступающих от различных НКА;
 - оценить геометрический фактор, соответствующий заданной конфигурации НКА и заданному географическому расположению потребителя;
 - оценить погрешность определения координат навигационным приемником.
2. Определить влияние географического расположения потребителя на характеристики навигационного поля в зоне видимости, в т. ч.:
 - изменить географическое расположение потребителя по широте и повторить перечисленные выше действия;
 - построить зависимости геометрического фактора и погрешности определения координат от широты потребителя;
 - выполнить описанные действия, сменив информацию об альманахе и эфемеридах, отметить произошедшие изменения.

4. *Контрольные вопросы*

1. Какое минимальное количество навигационных спутников необходимо иметь в зоне видимости пользователя для определения его местоположения?

2. Как зависит точность определения местоположения пользователя от количества навигационных спутников в зоне его видимости?
 3. Объяснить влияние расположения навигационных спутников на небосводе на точность определения местоположения пользователя.
 4. Объяснить влияние уровня сигналов от навигационных спутников на точность навигации.
 5. Что характеризует геометрический фактор?
 6. От чего зависит геометрический фактор и влияет ли на его величину географическое расположение потребителя?
 7. Как можно улучшить геометрический фактор?
5. *Содержание отчета:* цель работы, результаты проведенных исследований в виде графиков и письменные ответы на приведенные контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 3.

Исследование точности навигации в дифференциальном режиме

1. *Цель работы:* подтверждение факта повышения точности определения местоположения потребителя в дифференциальном режиме навигации.
2. *Указания к выполнению*
Работа проводится на испытательном стенде (рис. 4) в режиме имитации спутникового навигационного сигнала.
3. *Порядок выполнения*
 1. Подготовить оборудование для имитации навигационного поля, соответствующего заданной эфемеридной информации и заданному географическому расположению неподвижного потребителя (П1).

2. Запустить оборудование для имитации навигационного поля.
3. Снять зависимость определяемых навигатором координат местоположения потребителя от времени за 120 секунд наблюдения.
4. Определить по полученным зависимостям среднеквадратические значения координат и среднеквадратические погрешности их определения; погрешности определяются путем сравнения заданных значений координат и получаемых навигатором.
5. Повторить имитацию навигационного поля по пп. 1, 2 для другого расположения потребителя (П2), стоящего от предыдущего на расстоянии R_{12} .
6. Выполнить измерения по пп. 3, 4.
7. Сравнить полученные погрешности в новом испытании с полученными в предыдущем случае, убедиться в корреляции этих погрешностей.
8. Увеличивая расстояние R_{12} , убедиться в снижении корреляции получаемых погрешностей.
9. По полученным данным оценить уровень погрешности определения координат потребителя в дифференциальном режиме, построить зависимость погрешности определения координат потребителя в дифференциальном режиме от расстояния R_{12} до контрольно-корректирующей станции.
4. *Контрольные вопросы*
 1. В чем состоит сущность дифференциального режима навигации?
 2. Почему точность навигации в дифференциальном режиме выше, чем в номинальном?
 3. Как реализовать дифференциальный режим навигации?
 4. Сколько контрольно-корректирующих станций требуется для обслуживания потребителей в дифференци-

альном режиме на территории г. Екатеринбурга, всей Свердловской области?

5. *Содержание отчета:* отчет должен содержать результаты измерений, вычислений, ответы на контрольные вопросы и выводы по проделанной работе.

Лабораторная работа № 4. Влияние помех на НАП

1. *Цель работы:* выполнить исследование влияния различных помех на погрешность определения GPS-приемником координат своего местоположения.

2. *Указания к выполнению*

Работа проводится на испытательном стенде (рис. 4) в режиме имитации GPS-сигнала и имитации помех.

Исследование проводится для трех видов помех, попадающих в полосу GPS-приемника: узкополосная, сигналоподобная и широкополосная.

Узкополосная помеха представляет высокочастотное колебание без модуляции с расстройкой Δf по частоте относительно несущей частоты 1575,42 МГц сигнала GPS.

Сигналоподобная помеха представляет ФМ колебание с параметрами: несущая частота — 1575,42 МГц, символьная скорость — 1 МГц, модулирующая последовательность 10-го порядка.

Широкополосная помеха формируется в виде колебания с периодической частотной модуляцией по треугольному закону с параметрами: несущая частота — 1575,42 МГц, частота модулирующего сигнала — 1 МГц, девиация частоты — 100 кГц.

Параметры помех могут быть изменены по указанию преподавателя.

3. *Порядок выполнения*

1. Запускается генерирование GPS-сигнала по описанному выше алгоритму;
2. Задается режим работы GPS-приемника — Auto.
3. По окну Data View в программе u-Center ожидается переход GPS-приемника в режим слежения за спутниками и определения координат местоположения.
4. С генератора помех подается помеха заданного вида и установленного уровня. Оценка действия помехи ведется по графику зависимости точности определения местоположения от времени (параметр РАСС3D в программе u-Center).
5. Из полученного графика фиксируется значение точности, соответствующее установившемуся режиму. Результаты испытаний должны быть представлены в виде графиков:
 - зависимости точности определения координат приемником GPS от отношения помеха/сигнал; графики должны быть построены до пороговых значений отношения помеха/сигнал, при которых наступает срыв слежения;
 - зависимости порогового значения уровня узкополосной немодулированной помехи от частоты помехи.

4. *Контрольные вопросы*

1. Почему системы спутниковой навигации чувствительны к действию помех?
2. В чем проявляется действие помех?
3. Какова величина порогового отношения помеха/сигнал, при которой наступает срыв работы навигационного приемника?
4. Какие виды помех оказывают наиболее сильное влияние на работу навигационного приемника?
5. Какие меры позволяют снизить влияние помех?

5. *Содержание отчета*: отчет должен содержать результаты измерений, ответы на контрольные вопросы и выводы по проделанной работе.

Лабораторная работа № 5.

Разработка траектории движения для транспортного средства

1. *Цель работы*: получить практические навыки по разработке сценариев движения НАП; выполнить исследование влияния различных факторов на точность определения скорости и координат НАП.

2. *Указания к выполнению*

Команды для создания сценариев движения НАП:

- 1) **Reference** определяет положение транспортного средства в начале имитируемого сценария и указывает исходное направление и скорость;
- 2) **Accelerate** используется для изменения скорости. Она задается посредством изменения скорости (**speed change**) (или конечной скорости (**final speed**)) и продолжительности (**duration**) (или расстояния (**distance**)) за которое изменяется скорость. Транспортное средство сохраняет свое направление полета и высоту на протяжении всего маневра;
- 3) **Accel turn** изменяет скорость и направление. Accel Turn использует изменение скорости в направлении полета и боковое ускорение (в горизонтальной плоскости), которое, в свою очередь, определяет скорость изменения направления полета. Продолжительность маневра зависит от скорости транспортного средства;
- 4) **Climb** используется для изменения высоты транспортного средства. Для применения этой команды необходимо указать набор высоты в отношении требуемо-

го изменения высоты, скорости изменения высоты и ускорения пикирования в начале и в конце маневра. Маневр предполагает, что самолет находится под нулевым углом падения по отношению к вектору скорости самолета, выровненному по продольной оси. Поэтому угол возвышения самолета непосредственно связан со скоростью набора высоты;

- 5) **Straight** используется для прямого и ровного полета, определенного с помощью **Duration** (или **Distance**) и **Heading type**;
 - 6) **Turn** изменяет направление наземного транспортного средства. Укажите направление полета и радиус поворота (или изменение курса). Наземное транспортное средство сохраняет угловую скорость на протяжении всего поворота, за исключением начала и конца команд поворота при активной интенсивности ускорения и ускорении.
 - 7) **Waypoint** указывает промежуточные точки маршрута в отношении широты, долготы и высоты и обозначает положение, к которому движется транспортное средство на текущей скорости.
3. *Порядок выполнения*
1. Напишите сценарий, используя перечисленные команды, в котором навигационная аппаратура потребителя движется с постоянной скоростью.
 2. При помощи среды u-Center измерьте значения скорости, определяемые НАП на интервале 600 секунд.
 3. Используя методику в п. 2.3 и формулу (7), вычислите среднюю ошибку измерения скорости навигационным приемником.
 4. Напишите сценарий движения навигационной аппаратуры потребителя с переменной скоростью, изменяющейся от 50 м/с до 450 м/с по линейному закону за 600 секунд.

5. Повторите пункты 2 и 3 для данной ситуации. Сравните средние ошибки измерения скорости для двух случаев.
 6. Напишите сценарий, в котором навигационная аппаратура потребителя движется по круговой траектории с постоянной скоростью 100 м/с.
 7. Используя методику в п. 2.3 и формулу (6), вычислите среднее отклонение координат имитируемой траектории и полученных от НАП с исходными траекториями движения.
 8. Напишите сценарий, в котором навигационная аппаратура потребителя неподвижна в течение всего времени.
 9. Используя методику в п. 2.3 и формулу (6), вычислите среднее отклонение координат имитируемой траектории и полученных от НАП с исходными траекториями движения.
 10. Сравните результаты, полученные в п. 7 и 9.
4. *Контрольные вопросы*
1. Какой сигнал формируется на радиочастотном выходе имитатора навигационных сигналов?
 2. Что изменяется в имитируемом навигационном сигнале при изменении местоположения потребителя, при изменении скорости движения потребителя?
5. *Содержание отчета:* отчет должен содержать результаты измерений, ответы на контрольные вопросы и выводы по проделанной работе.

Лабораторная работа № 6.

Влияние затенения и многолучевого распространения радиоволн

1. *Цель работы:* выполнить исследование влияния затенения и многолучевого распространения на точность определения координат НАП.

2. *Порядок выполнения*

1. Создайте сценарий движения по произвольной траектории.
2. Оцените точность определения координат по параметру РАСС3D, отображаемому в среде u-Center.
3. В среде SimGEN выключите сигнал от одного из спутников и оцените значение параметра РАСС3D.
4. Затем, отключая все больше сигналов от навигационных спутников, каждый раз фиксируйте значение точности определения координат приемником РАСС3D.
5. Постройте график зависимости значения РАСС3D от количества затененных сигналов от спутников.
6. Создайте сценарий с многолучевыми сигналами, характерными для городской местности.
7. Проведите измерения точности измерения координат НАП (параметр РАСС3D) при наличии и при отсутствии многолучевых сигналов. Сравните результаты.
8. Проведите исследование с другим типом многолучевых сигналов по указанию преподавателя. Сравните результаты между собой.

3. *Контрольные вопросы*

1. В чем отличие отраженного сигнала от обычного на входе навигационного приемника?
2. В каких условиях возникает больше многолучевых сигналов?
3. Какие существуют способы борьбы с многолучевостью?

4. *Содержание отчета:* отчет должен содержать результаты измерений, ответы на контрольные вопросы и выводы по проделанной работе.

Библиографический список

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — 4-е изд. перераб. и доп. — М. : Радиотехника, 2010. — 800 с.
2. Перов А. И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем : учеб. пособие для вузов / А. И. Перов. — М. : Радиотехника. — 2012. — 240 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. — изд. 2-е, испр. — М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. — 1104 с: ил. — Парал. тит. англ.
4. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR И ГЛОНАСС / В. С. Яценков. — М. : Горячая линия — Телеком, 2005. — 272 с.: — ил.
5. Соловьев Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. — М. : Эко-Трендз, 2003. — 326 с.
6. Конин В. В. Системы спутниковой радионавигации. Национальный авиационный университет / В. В. Конин, В. П. Харченко — Киев : Холтех, 2010. — 520 с.
7. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). — М., 2007. — 70 с.
8. Валеев В. Г. Спутниковая радионавигационная система GPS : лабораторный практикум / В. Г. Валеев, И. Н. Корнилов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. — 2010. — 22 с.
9. Валеев В. Г. Экспериментальное исследование помехоустойчивости аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем / В. Г. Валеев, И. Н. Корнилов, В. Э. Иванов // Радиотехника. — 2011. — № 9.
10. Компания Spirent : сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.spirent.com/Positioning-and-Navigation/>. — Загл. с экрана.

Учебное издание

Корнилов Илья Николаевич

**ТЕСТИРОВАНИЕ
НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ
ПОТРЕБИТЕЛЯ GPS/ГЛОНАСС**

Корректор Е. Е. Афанасьева
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 02.05.2017. Формат 60×84/16.
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 2,2. Усл. печ. л. 2,8. Тираж 50 экз.
Заказ 152

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

